

В.Ю. Климашов
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ НАЧАЛЬНОЙ И АКТИВНОЙ ФАЗ МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА

Ключевые слова: Параллельные вычисления, атмосферное электричество, вычислительный эксперимент.

Рассматриваются программно реализованные подходы к численному моделированию молниевое разряда. Модель представлена двумя взаимосвязанными структурами для раздельного исследования начальной и активной фазы молниевое разряда. Приводятся примеры результатов реализации модели на вычислительном кластере.

Грозовое электричество – одна из фундаментальных проблем атмосферной физики. Несмотря на большой объем известных исследований, касающихся многочисленных аспектов физики грозы, законченное понимание процессов формирования электрической структуры грозовых облаков, инициирования пробоя и распространения молнии, а также процессов инициирования грозой электрических разрядов в мезосфере до сих пор отсутствует. Широкомасштабный характер явления, отражающий его безусловную сложность, дает и ключ к пониманию его основных закономерностей. Согласно натурным измерениям, широкомасштабная динамика грозового электричества качественно производит впечатление самоорганизующегося и самонастраивающегося критического режима. Упрощающим аспектом поведения является тот факт, что статистические свойства этого режима описываются в некотором диапазоне параметров простыми степенными законами. Последнее обстоятельство позволяет применять в задачах электродинамики атмосферы методов фрактальной геометрии, причем в двух аспектах. Во-первых, средства фрактального анализа используются для обработки данных натурных экспериментов. Во-вторых, фрактальная идеология, как математический язык концепции самоорганизованной критичности, положена в основу моделирования динамики грозового облака.

Моделирование молниевое разряда было решено поделить на две отдельные, но тесно связанные между собой стадии: мелкомасштабная предварительная стадия формирования лавин электронов и крупномасштабная, активная стадия внутриоблачных разрядов и разрядов на землю. Такое деление было сделано для более детального рассмотрения процессов, происходящих в грозовом облаке, связей между ними и причин их возникновения и развития.

Для рассмотрения первой стадии моделировалось стохастическое движение электронов в небольшом объеме (1 см^3) предгрозового облака. Внутри рассматриваемой области равномерно распределялись заряженные частицы. Величины зарядов частиц взяты нормально распределёнными, с максимальным по модулю значением 10–11 Кл, с соблюдением общей электронейтральности рассматриваемой области. Такой заряд несут частицы льда, капельки воды, частицы пыли, распределённые внутри грозового облака. Для моделирования было выбрано 1000 частиц, что примерно соответствует реальному составу грозового облака. Т.к. временные интервалы, рассматриваемые в задаче, малы (микросекунды), можно считать, что частицы-носители заряда в это время остаются неподвижными, их положение, величина заряда, геометрические формы и размеры остаются неизменными. Далее, внутрь рассматриваемой области «запускались» электроны с разными начальными скоростями – от нулевой до тепловой. На каждом шаге модельного времени рассчитывались скорость, траектория движения электрона внутри области до момента её покидания или «остановки» электрона из-за столкновения с положительно заряженной частицей.

Вычислительная трудоемкость этой части алгоритма состояла в следующем:

- на каждом шаге модельного времени рассчитывались силы, действующие на электрон со стороны остальных (свободных) зарядов, находящихся в облаке;
- требовалось рассчитать влияние каждого свободного заряда и определять суперпозицию сил;
- последовательно находить изменения ускорения, скорости и координаты;
- количество шагов заранее неизвестно.

Однако разработанная математическая модель позволила реализовать эффективное распараллеливание вычислительного алгоритма, поскольку расчёт воздействия на отдельный рассматриваемый электрон (как одиночный, так и в составе ансамбля) со стороны свободных зарядов может проводиться независимо. Каждая частица оказывает своё влияние, которые в дальнейшем суммируются по принципу суперпозиции сил. Сами расчёты выполнялись по одинаковым правилам для всех частиц, что позволило эффективно обеспечить параллелизм на уровне данных, используя возможности графических вычислителей на SIMD-архитектуре. Для реализации такого подхода весь условный массив свободных зарядов делился на несколько частей по числу доступных вычислительных ресурсов (потоков). Хранение в памяти исходных данных для каждого шага модельного времени организовывалось таким образом, чтобы можно было осуществлять быстрый без коллизий доступ всеми потоками к требуемым элементам. Каждый из потоков обрабатывал несколько зарядов, вычисляя вклады каждого из них, а сами потоки работали параллельно друг другу.

В процессе моделирования было доказано, что электрон за счёт взаимодействия с частицами среды может приобретать энергию порядка 15–17 эВ, что достаточно для ионизации нейтральных частиц среды – «вышибания» из них новых электронов. Вновь образовавшиеся электроны, в свою очередь, также разгоняются под действием кулоновских сил и тоже начинают ионизовать нейтралы. Таким образом, в электронейтральном облаке, находящемся в состоянии самоорганизованной критичности, от элементарного воздействия образуется лавина электронов, приводящая к возникновению молниевых разрядов.

Следующим этапом было моделирование активной стадии молниевых разрядов внутри облака. Был сделан переход на крупномасштабные области, но в целом начальные условия были схожи с предыдущей задачей. В качестве рассматриваемой области была выбрана «часть» грозового облака, в котором случайным образом распределены заряды, не превышающие по модулю 10–11 Кл. Количество зарядов в системе – порядка 20 000. На первом модельном шаге находилась пара соседних зарядов, между которыми была наибольшая разница потенциалов. Эта разница потенциалов считалась критической, и между частицами инициировался пробой (электрический разряд), выравнивающий потенциалы на частицах. Эта связь инициировала проводящий кластер, в котором участвующие заряды становились вершинами, а связи – рёбрами. На следующем шаге модельного времени возникший пробой может инициировать пробои соседних связей. Для инициации такого пробоя рассчитывалась разница потенциалов между свободной активной периферийной вершиной кластера и соседними зарядами. Если она превышала некоторый фиксированный уровень активации, значение которого меньше критического, то считалось, что произошел пробой, к активному кластеру добавился новый заряд.

После инициации всех пробоев запускалась процедура выравнивания потенциалов на всех вершинах кластера. Для этого рассчитывались реальные токи, протекающие между заряженными частицами, в соответствии с их ёмкостью и сопротивлением канала. Таким образом, выравнивание потенциала происходило за счёт моделирования реального перетекания заряда между частицами, что достаточно точно соответствует реальной физике процесса и в целом уточняет используемую модель. Параллельно проводилась процедура проверки отмирания рёбер активного кластера. Для этого проверялись токи, текущие к периферийным вершинам кластера, и если такой ток к

определённой вершине бы ниже заданной величины, связь разрывалась, заряженная частица исключалась из кластера и снова становилась свободной.

После процедуры перетекания зарядов начинался новый шаг модельного времени, и вычислялись потенциалы на заряженных частицах для инициации новых пробоев.

Очевидно, что этот вычислительный эксперимент гораздо более вычислительно сложен, чем описывающий начальную стадию моделирования. Данная задача характеризуется очень высокой вычислительной сложностью: для расчета взаимодействия N тел требуется выполнить $O(N^2)$ операций. К примеру, расчёт потенциалов для 40000 заряженных частиц по принципу «все со всеми» требует выполнить $\sim 2 \times 10^9$ операций на каждом шаге модельного времени, которых предполагались сотни. Как следствие, для решения задачи требовалась оптимизация алгоритма. Для этого, во-первых, было решено немного изменить саму модель таким образом, чтобы на каждом очередном шаге рассчитывались потенциалы не на всех частицах, а только на тех, которые являются ближайшими «соседями» для активных вершин проводящего кластера (молниевое разряда). Для этого на этапе инициализации вычислительного эксперимента для каждой частицы моделируемой области рассчитывался список таких соседей по ранее выбранным условиям, чтобы впоследствии не тратить ресурсы на эти перерасчёты. Такое упрощение дало ощутимый выигрыш по скорости работы алгоритма. При этом по мере роста кластера увеличивается количество периферийных точек, рёбер, а, следовательно, растёт общее количество вычисляемых и проверяемых параметров. Сами же расчёты для инициации пробоев от периферийных точек до «соседей» могут также выполняться параллельно. При условии большого количества таких точек, а также большого количества шагов модельного времени, параллелизация также даёт выигрыш по скорости. Однако из-за особенностей расчётов в данном случае нельзя использовать SIMD-архитектуру графических ускорителей. Кроме того, неэффективно использовать варианты с распределёнными вычислениями, т.к. время, затрачиваемое на передачу данных, в общем случае будет даже замедлять работу программы. Таким образом, для параллелизации этих расчётов использовались вычислительные мощности центрального процессора.

Таким образом, особенности моделирования активной стадии молниевое разряда заключались в следующем:

- моделировалось поведение системы, состоящей из порядка 20 000 заряженных частиц, а также 20 000 отражённых частиц от поверхности земли;
- для расчёта потенциалов требуется расчёт «все со всеми»;
- увеличение вычислительной сложности алгоритма по мере расчётов.

Результаты моделирования показали правильность выбранной и реализованной физической модели. Поведение вычислительной системы по результатам моделирования в целом достаточно точно соответствовало реальным грозовым системам. В процессе моделирования, рост кластера внутри системы активно нейтрализовал среду, обнуляя заряды на частицах, которые ему принадлежали, и, в случае, если для поддержки «жизни» кластеру не хватало внутриоблачной среды, инициировался разряд на землю. В среднем, это был один из 6 внутриоблачных разрядов, что также соответствует реальным статистическим данным.

Для проверки и верификации результатов всех этапов моделирования был создан отдельный программный комплекс. В состав комплекса вошли:

- 3D-визуализатор движения электрона в грозовом облаке на предварительной стадии молниевое разряда;
- 3D-визуализатор активной фазы развития внутриоблачного молниевое разряда с возможностью разряда на землю;
- программа картирования молниевое разряда с возможностью сбора статистики по процессу моделирования.

Доклад подготовлен по результатам исследований, выполненных в рамках подержанного Мегагрантом Правительства РФ проекта – госконтракт 14.B25.31.0023.